

Аспекты развития 6G-сетей

Часть 1

М. Макушин¹

УДК 621.396 | ВАК 2.2.2

В начале 2030 годов ожидается начало развертывания 6G-сетей связи. В следующем году ожидается появление их первого общего стандарта. В статье затронуты вопросы архитектуры а также основных технологий, требующихся для развертывания 6G-сетей, и проблемы их реализации. Рассмотрена маршрутная карта развития 6G-сетей, составленная специалистами ЕС и США, а также примеры различных разработок для 6G-сетей.

По мере развертывания в мире 5G мобильных сетей исследовательские организации различных стран, самостоятельно или совместно, изучают возможности следующего поколения – 6G-сетей связи. В отличие от 5G и предыдущих поколений беспроводных технологий, предназначенных для повышения производительности сети за счет увеличения пропускной способности, снижения времени ожидания и повышения надежности, экосистемы 6G считаются платформой, способствующей инновациям в области вычислений, искусственного интеллекта (ИИ), возможностей подключения (подключаемости), датчиков, виртуализации и многого другого.

Платформа 6G проектируется под соответствие требованиям более широкого глобального охвата, большей спектральной эффективности, устойчивости и безопасности

работы, а также ряду других параметров. Развитие самой платформы приводит к появлению новых архитектурных решений, технологий и ужесточению требований к материалам. В настоящее время 6G-сеть рассматривается как полностью интегрированная интернет-система, обеспечивающая мгновенную связь между пользователями, устройствами, транспортными средствами и окружающей средой. То есть речь идет и о выходе за рамки Интернета вещей (IoT), переходу к «Всеохватывающему Интернету»ⁱ [1]. В 6G-сетях будут использоваться новые методы сбора энергииⁱⁱ и материалы, обеспечивающие высокие энергоэффективность и экологичность [2].

Появление единого стандарта 6G-сетей ожидается в 2025 году, а начало их коммерческого развертывания – в 2030 году [3].

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ЭРЫ 6G: АРХИТЕКТУРА, ТЕХНОЛОГИИ И ПРОБЛЕМЫ

Сети 6G обеспечат скорости передачи данных порядка 1 Тбит/с со сверхнизким временем ожидания, измеряемым в микросекундах. Также 6G сочетает в себе технологии пространственного мультиплексирования и использование терагерцевой частоты, что увеличивает пропускную способность по сравнению с 5G-сетями более чем в 1000 раз. В табл. 1 сравниваются основные характеристики 5G и 6G.

Архитектура и применения

Существующая сетевая архитектура не обеспечивает качество обслуживания перспективных приложений, требующих сверхвысокой пропускной способности, сверхмалого времени ожидания и высокой надежности. Соответственно, требуется разработка новой сетевой архитектуры. Сейчас описать ее точно и детально невозможно. Поэтому лучше рассмотреть реализацию 6G-сетей в различных средах (космические, воздушные, подводные и наземные

¹ НОБ «Военные науки и оборонная промышленность» БРЭ, ведущий научный редактор.

ⁱ **IoE (Internet of Everything)** – «Всеохватывающий Интернет», дальнейшее развитие «Интернета вещей» (IoT, Internet of Things), в рамках которого осуществляются контакты между людьми, людьми и вещами (в т. ч. машинами и сетями датчиков), между вещами (в т. ч. межмашинный обмен данными, обмен данными между сетями данных, сетями данных и машинами), а также поддерживающие это процессы. Понятие, относящееся к ситуации, когда в любое время любой человек и любая вещь могут быть соединены в Интернет-подобной среде.

ⁱⁱ **energy harvesting (= power harvesting/energy scavenging)** – сбор/преобразование энергии, процесс, при котором энергия, получаемая из внешних источников (солнечная энергия, тепловая энергия, энергия ветра, перепад солености воды, кинетическая энергия), поглощается и хранится для малых беспроводных автономных приборов, наподобие используемых в носимой (вмонтированной в одежду/аксессуары) электронике и беспроводных сенсорных сетях.

сети) с учетом универсальной архитектуры, перспективных технологий и решений (рис.1).

Основная цель 6G-сетей – обеспечение глобального покрытия. Современная сетевая архитектура основана на эволюции и наследовании предшествующих наземных сетей сотовой связи, что выливается в два недостатка:

- неспособность реализовывать коммуникационные сценарии, происходящие в воздухе или под водой (неизбежное требование перспективных сервисов);
- обеспечение связи по всему миру требует создания сетей сотовой связи высокой плотности, что связано с очень высокими затратами.

Устранение этих недостатков требует создания полностью интегрированной системы связи, включающей в себя космос, воздух, землю и море [4].

Космические сети связи

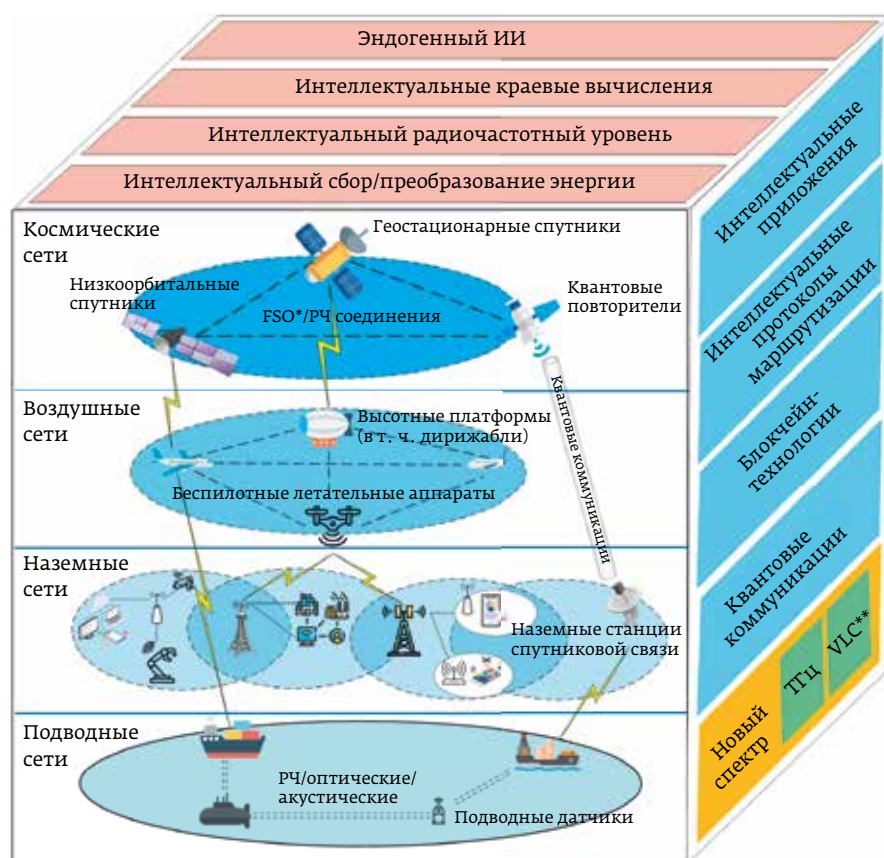
С точки зрения стоимости и пропускной способности широкополосный доступ в Интернет, аналогичный наземному, могут обеспечить системы спутниковой связи с высокой пропускной способностью (high-throughput satellite, HTS). Большинство спутников связи расположены на геостационарных орбитах (около 35,8 тыс. км), что приводит к чрезмерному увеличению времени ожидания и делает невозможной интеграцию с наземными мобильными сетями. Решение этой проблемы – спутниковые системы с негеостационарными орбитами (NGSO), обеспечивающие глобальный доступ в Интернет с низким временем ожидания при передаче и высокой скоростью передачи данных. Ныне осуществляется коммерциализация спутниковых систем Starlink (США), OneWeb (ЕС) и Hongyan (КНР):

Система Starlink разворачивается корпорацией SpaceX (США), предполагается, что к 2027 году будет развернута группировка в составе 12,0 тыс. спутников, из которых 4425 будут размещены на низких околоземных орбитах (LEO), а 7518 на очень низких околоземных орбитах (VLEO), работающих на орбите примерно в 340 км от Земли [5]. Всего же планируется запустить 42 тыс. спутников (в зависимости от разрешения контролирующих органов). По состоянию на 19.01.2024 на орбите Земли находился 4541 спутник [6].

Система OneWeb разворачивается в рамках общеевропейского проекта Eutelsat. Ожидаемый состав группировки – 648 LEO-спутников (600 – активные, 48 – резервные или для расширения услуг). В мае 2023 года число спутников на орбите достигло 634 [7].

В КНР за развитие спутниковой группировки из 13 тыс. спутников для разворачивания 6G сетей к 2034 году отвечает государственное предприятие Guowang (China Satellite Network Group), созданное в 2021 году. Около 10% из них компания планирует запустить в ближайшие пять лет. Полная группировка после 2034 года будет насчитывать 26 тыс. спутников [8].

Хотя для полного разворачивания спутниковых систем требуется много времени, конвергенция космических, наземных и LEO-спутниковых сетей уже доказала свои преимущества в теории, моделировании и на практике. В сетях LEO-спутниковой связи, использующих лазерную и радиочастотную маршрутизацию, механизм совместной маршрутизации обеспечивает меньшее время ожидания по сравнению с наземной волоконно-оптической сетью с дальностью связи более 3 000 км [5].



* Free Space Optics – беспроводная передача данных в атмосфере, космическом пространстве, вакууме при помощи ИК-излучения или видимого диапазона длин волн

** Visible Light Communication – технология передачи данных в видимом диапазоне длин волн, частью оптической беспроводной связи (optical wireless communications, OWC).

Рис. 1. Обобщенное представление архитектуры 6G-сетей связи

Таблица 1. Сопоставление основных характеристик 5G- и 6G-технологий

Характеристики	Технология	
	5G New Radio	6G
Пиковая скорость передачи данных	20 Гбит/с	1 Тбит/с
Время задержки, мс	1	Менее 1
Удельная пропускная способность	10 Мбит/с/м ²	1 Гбит/с/м ²
Полосы частот	Суб-6-ГГц, миллиметровая (24–52,6 ГГц)	Суб-6-ГГц, миллиметровая (24–52,6 ГГц)
		Терагерцевая, VLC*
Удельная плотность соединений	1 млн приборов на 1 км ²	10 млн приборов на 1 км ²
Приборная функциональность	Надежная подключаемость	Сценарии взаимодействия на физическом уровне в реальном масштабе времени
Тип сети	Программно-управляемые сети (SDN), сети с виртуализацией функций** (NFV), «сети с нарезкой»***	SDN, NFV, интеллектуальные облачные сети, «сети с нарезкой» на основа ИИ
		Машинное обучение, глубокое обучение
Техника вычислений	Туманные/краевые вычисления****, облачные вычисления	Квантовые вычисления, туманные/краевые вычисления
Технология	Межприборная (D2D) связь, ультра-плотные сети, ретрансляционные сети, сети с доступом через малые соты****, сети с неортогональным множественным доступом (NOMA)	VLC и квантовые коммуникации, внутренний ИИ, блокчейн, размещение интеллектуальных ресурсов
Применения	Дополненная (расширенная) реальность (AR), виртуальная реальность (VR), Интернет вещей, интеллектуальные города, умные дома	AR/VR/смешанная реальность, телеробототехника, телеобразование, всеохватывающий Интернет.

* **Visible Light Communication** – технология передачи данных в видимом диапазоне длин волн, часть оптической беспроводной связи (optical wireless communications, OWC).

** **Network Function Virtualization** – виртуализация сетевых функций – новая, перспективная технология, позволяющая программно создавать такие сервисы, которые сейчас доступны только в виде аппаратных решений. Виртуализации сетевых функций позволяет устанавливать сервисы там, тогда и в том количестве, которое востребовано сейчас и в данном месте.

*** **Network slicing** – «сетевая нарезка», возможность логической нарезки инфраструктуры 5G-сети на сетевые слои, ориентированные на разные бизнес-приложения и разные технологий радиодоступа. В свою очередь эти слои могут быть отдельно оптимизированы под различные требования скоростей передачи данных различными технологиями радиодоступа

**** **edge computing** – краевые вычисления, метод оптимизации облачных вычислительных систем путем дополнения обработки данных на границе сети вблизи источника данных. Данный подход позволяет снизить интенсивность информационного обмена между датчиками и центром обработки данных, выполняя обработку сгенерированных данных в источнике или вблизи него. Требуется использования ресурсов, не подключенных к сети постоянно (ноутбуки, смартфоны, планшетные ПК, датчики и т. п.

***** **Small cell** – малая ячейка (малая сота), узел радиодоступа с малой потребляемой мощностью, работающий в лицензируемом и нелицензируемом спектрах и обладающая диапазоном действия от 10 м до 1–2 км. Малые ячейки являются важным элементом разгрузки сетей данных и более эффективным (чем макросоты) средством управления спектром. К малым сотам относятся фемтосоты, пикосоты и микросоты

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ «АРМИЯ-2024»**

**12–18 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

www.rusarmyexpo.ru

Сети воздушной связи

Сети воздушной связи в зависимости от высоты полета делятся на две категории. Высотные платформы (High-altitude platforms, HAP, в том числе дирижабли) работают в стратосфере, низковысотные платформы (Low-altitude platforms, LAP, в основном беспилотные летательные аппараты, БПЛА) – на высотах в нескольких километрах от поверхности. HAP по сравнению с LAP обладают большими охватом и стабильностью (аналогично LEO-системам). С другой стороны, LAP-сети на основе БПЛА могут быть быстро развернуты, гибко сконфигурированы и обеспечивать хорошую производительность связи на малых расстояниях.

Кроме того, БПЛА играют роль мобильных базовых станций и ретрансляционных узлов в многоступенчатой связи, способствуя сближению наземных и внеземных сетей. Эти характеристики делают сети на базе БПЛА незаменимым компонентом будущих сетей 6G. Одной из уникальных особенностей беспроводных сетей на базе БПЛА является возможность быстрой настройки мобильной сети без использования предустановленных инфраструктур. Она подходит для сценариев стихийных бедствий, аварийно-спасательных работ и боевых действий. Более того, сети БПЛА подходят для временного развертывания служб связи. Кроме преимуществ, связанных с повышением производительности и надежности, сети БПЛА сталкиваются с различными проблемами, такими как экономия энергии, прогнозирование траектории и балансировка нагрузки [9].

Подводные сети связи

Подводные линии радиосвязи в основном используют три технологии связи: оптическую, радиочастотную и акустическую. Непредсказуемая водная среда затрудняет развертывание систем связи, приводит к серьезному ослаблению сигналов и нанесению физического ущерба сетевым устройствам. Еще одна проблема – возможность энергоснабжения сетевых устройств. Для решения этих проблем предложен ряд подходов:

- совершенствование схем динамического кодированного взаимодействия для повышения производительности акустических систем;
- улучшение алгоритмов кластеризации для оптимизации энергоэффективности подводных сетей акустических датчиков;
- создание новых методов связи, например, на основе волн напряжения (stress wave communication, метод отправки и приема сообщений с использованием самой структуры хоста в качестве среды передачи), для повышения производительности подводных сред связи [10].

Новые характеристики 6G

При разработке 6G-сетей необходимо учитывать разные аспекты: интеграцию ИИ, интерактивное взаимодействие

в реальном масштабе времени, интеллектуальный радиочастотный уровень, новый набор сетевых протоколов и т. д.

Эндогенный ИИ. В последние годы технологии ИИ, в частности машинное обучение, привлекают внимание и научных кругов, и промышленности. ИИ уже используется при развертывании и эксплуатации 5G-сетей для оценки канала на физическом уровне, на уровне управления доступом к среде передачи данных (Media Access Control, MAC) и распределения ресурсов на сетевом уровне. Но в эпоху 5G-сетей трудно реализовать весь потенциал ИИ и на этапе запуска он не был интегрирован в их архитектуру.

6G-сети, сложные и гетерогенные системы с разнообразными требованиями к обслуживанию и огромным числом подключенных устройств, требуют новой модели ИИ, обладающей самосознанием и самоадаптивностью. ИИ необходимо внедрить во всю структуру сети, в которой восприятие и процесс формирования логических выводов систематически взаимодействуют. В конечном итоге это позволит всем элементам системы самоконфигурироваться и адаптироваться, обладать способностью распознавать неожиданные ситуации [4].

Интерактивность в реальном масштабе времени.

6G-сетям потребуется взаимодействие сервисов и приложений в реальном масштабе времени. Пример – интеллектуальные системы управления транспортом, в которых высокоскоростные автономные транспортные средства на дороге взаимодействуют с окружающей средой, другими автомобилями и людьми в реальном масштабе времени. Существующие решения, основанные на ИИ и облачных технологиях, ориентированы только на обработку статических данных и не гарантируют выполнение требований в реальном масштабе времени.

В ходе ряда исследований установлено, что для сокращения времени реакции сервисов и предоставления услуг в реальном масштабе времени будут эффективны решения с использованием ИИ в краевых сетях, где выполняются интеллектуальные прогнозы, формирование логических выводов и решений. Также предложены решения для:

- обнаружения объектов в реальном масштабе времени на основе краевых вычислений и ИИ;
- семантической сегментации в реальном масштабе времени на основе краевых вычислений и нейронных сетей глубокой свертки для интеллектуальных транспортных приложений [11].

Уровень интеллектуальной радиосвязи. В отличие от физического уровня первоначального ИИ, уровень интеллектуальной радиосвязи – это концепция, направленная на разделение аппаратного обеспечения и алгоритмов приемопередатчика. Она работает как единая платформа, где предсказуемые аппаратные возможности



УДВОЙТЕ БАЗУ
РЕАЛЬНЫХ КЛИЕНТОВ!*

XXIV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
& ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

**25-27
СЕНТЯБРЯ
2024**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
КВЦ ЭКСПОФОРУМ



*Радэл-2023 посетили более 15 000 специалистов
Радэл-2022 посетили 7960 специалистов



www.radelexpo.ru
(812) 718-35-37

Таблица 2. Способы преодоления ослабления сигналов и направления дальнейших исследований в области ТГц-связи

Способы преодоления ослабления сигналов	Направления дальнейших исследований
Разработка новых алгоритмов управления ТГц-излучением для юстировки диаграммы направленности антенны в инновационных системах связи транспортных средств	Исследования в области транзисторов и материалов, пригодных для работы на сверхвысоких частотах
Создание новых систем межкристальной ТГц-связи для мобильных персональных устройств	Изучение аппаратных схем с низкими сложностью и энергопотреблением
Формирование комплексных решений оптимизации скоростей передачи данных в системах ТГц-связи со многими входами и выходами (MIMO)	Создание новых моделей каналов и помех
Совершенствование метода многомерного мультиплексирования для волоконных систем ТГц-связи (экспериментально достигнута скорость передачи данных 1 176 Гбит/с при дальности передачи 10 м в диапазоне 350 ГГц)	Разработка новых схем кодирования каналов и энергосберегающей модуляции
Разработка решений с улучшенной производительностью и энергопотреблением для развертывания систем ТГц-связи БПЛА с наземными конечными пользователями	Работы в области формирования массивных систем MIMO и мощных алгоритмов синхронизации

и алгоритмы приемопередатчика динамически устанавливаются на основе конфигурации оборудования, динамического доступа к спектру, управления и мониторинга мощности передачи на основе ИИ. Уже разработаны модели проектирования, адаптирующие платформы систем разнесения путем отделения алгоритмов приемопередатчика от аппаратного обеспечения.

Новый сетевой протокол. Современный Интернет использует набор протоколов TCP/IP, основанный на стековой архитектуре. Но он сталкивается с такими проблемами, как качество обслуживания (QoS), экономия энергии, конфиденциальность и безопасность перспективных приложений. Недавно было разработано несколько протоколов для улучшения существующего пакета TCP/IP, таких как быстрое подключение к Интернету по протоколу UDP (Fast UDP Internet Connection, QUIC). Дальнейшее совершенствование QUIC в целях повышения производительности 6G сетей предполагается на основе таких методов, как многоконвейерность, многопоточность и многоканальность, а также совершенствования методов планирования. Но все это усложняет набор протоколов и не может полностью устранить недостатки, присущие набору TCP/IP современного Интернета.

Предлагается также ряд других подходов:

- создание протокола управления на уровне MAC, основанного на бесконфликтной архитектуре полнодуплексной оптической беспроводной сети с разделением (для обеспечения гарантированного механизма доступа к каналу);

- формирование интеллектуального физического уровня 6G сетей для эффективного распределения радиоресурсов и поддержки QoS (обеспечение межмашинной связи);
- разработка архитектуры полного стека (для решения проблем терабитной связи) [4].

Ожидаемое развитие 6G-технологий

Одной из основных задач 6G-сетей является обеспечение скорости передачи данных (уровень Тбит/с), что требует перехода на более высокие частоты, использования ряда сопутствующих технологий и подходов.

Терагерцевый диапазон спектра

Терагерцевый диапазон (ТГц-диапазон) – революционная для 6G сетей технология, охватывающая частоты 0,1–10 ТГц. Этот диапазон обладает многими уникальными, ранее не использовавшимися характеристиками. Основные особенности этого диапазона:

- скорость передачи данных до 100 Гбит/с при доступной полосе пропускания в несколько ГГц;
- повышение безопасности связь (узкий луч и короткая длительность импульса ограничивают возможность прослушивания);
- волны этого диапазона могут проходить сквозь различные диэлектрики с низкими потерями, неметаллические материалы и материалы с низким поглощением (бумага, пластик, керамика, одежда и упаковочные материалы).

Таблица 3. Функциональное сопоставление терагерцового и VLC-спектров

Функциональность	Спектр	
	Терагерцовый	VLC
Доступные полосы частот, ТГц	0,1–10	Сотни терагерц
Способ передачи данных	Вне прямой видимости (NLOS)	В прямой видимости (LOS)
Электромагнитное излучение	Есть	Нет
Скорость передачи данных, Гбит/с	100	10
Спектральная политика	Лицензированные частоты	Нелицензируемые частоты
Глубина проникновения, мм	0,1–0,3	Прозрачные материалы
Интерфейс	Последовательный	Ограниченный
Издержки применения	Высокие	Низкие
Мощность передачи	Высокая	Низкая

- терагерцовое излучение также рассеивает меньше, чем излучение в оптической и ближней области ИК-спектра (большая длина волны).

За счет этого ТГц-диапазон является основным кандидатом для сверхскоростной беспроводной и кос-

мической связи. В 2019 году Федеральная комиссия США по средствам связи (FCC) одобрила эксперименты в диапазоне частот от 95 ГГц до 3 ТГц и выпустила новую лицензию для стимулирования развития ТГц-спектра. Институт инженеров по электротехнике и радио-

**информационные технологии и электроника
для пассажирского транспорта
и транспортной инфраструктуры**



+7 (495) 287-44-12 **info@e-transport.ru**

Реклама 12+

17-я международная выставка



**ЭЛЕКТРОНИКА
ТРАНСПОРТ
2024**

26-28 июня
Москва / Экспоцентр
www.e-transport.ru

электронике (IEEEⁱⁱⁱ, США) сделал первые шаги на пути к ТГц-стандарту связи, создав стандарты IEEE 802.15.x. Международный союз электросвязи (ITU) определил для беспроводных сетей диапазон частот 0,12–0,2 ТГц [12].

Одна из основных проблем ТГц-связи – сильное ослабление сигналов окружающей средой. Способы решения этой проблемы и направления дальнейших исследований приводятся в табл. 2.

Видимый диапазон спектра

Система передачи данных в видимом диапазоне спектра (VLC) использует все преимущества светоизлучающих диодов (СИД, освещение и высокоскоростная передача данных). VLC-связь на малых расстояниях (несколько метров) имеет много преимуществ перед традиционными методами радиосвязи:

- спектр видимого света обладает чрезвычайно широкой полосой пропускания и нелицензионным спектром;
- видимый свет не может пересекать блокирующие свет объекты, что повышает безопасность и снижает помехи в сценариях высокочастотной радиосвязи;
- VLC использует в качестве базовых станций источники светового излучения, не полагаясь на стационарную инфраструктуру;
- VLC не создает электромагнитного излучения и невосприимчив к внешним электромагнитным помехам.

Следовательно, VLC подходит для особо чувствительных к электромагнитному излучению применений – в больницах, на самолетах и т. д. В табл. 3 приведено подробное сравнение ТГц и VLC-каналов связи.

Квантовая связь

Возможности квантовой связи преодолевают ограничения традиционных решений связи в таких аспектах, как безопасность, конфиденциальность, вычислительные, коммуникационные и измерительные возможности. Технология квантовой связи находится на ранней стадии развития, ведущиеся исследования связаны с определением оптимальных структур, описании взаимосвязи квантовых узлов и компонентов, увеличении производительности (передача кубитов) и снижении сложности

сети. Также рассматривается возможность использование некоторых моделей современного Интернета при разработке квантового Интернета.

Одной из наиболее интересных характеристик квантовой связи является связь на большие расстояния, основанная на квантовых ретрансляторах. Это позволяет передавать данные без физической отправки запутанного кубита (квантовая запутанность) на полное расстояние – путем замены запутанности, генерируемой более короткими соединениями. В одном из недавних экспериментов при использовании ЛЕО спутникового ретранслятора была обеспечена квантовая связь на расстоянии 7600 км [4].

Технология блокчейна

Технология блокчейна наряду с ТГц-диапазоном может стать революционной для перспективной мобильной связи. Блокчейн обеспечивает более высокую конфиденциальность общения, так как позволяет различным сетевым объектам получать безопасный доступ к данным. Помимо этого блокчейн обеспечивает преимущества распределения ресурсов и доступа к сети, предлагает децентрализованную систему управления для установления прямых связей между объектами, что снижает связанные с этим расходы.

Блокчейн также помогает интегрировать уникальные системы, созданные различными операторами, предлагая единые метод аутентификации/авторизации и платежную систему, осуществление роуминга между операторами и сетями [13].

Интеллектуальный сбор/преобразование энергии

Рост требований к вычислительной мощности устройств IoT сопровождается все большей востребованностью их энергоэффективности. За последнее десятилетие в области сбора/преобразования энергии было проведено большое число исследований. По их результатам можно сформулировать следующие выводы:

- технологии сбора/преобразования энергии применяются для обеспечения оптимальной энергоэффективности интеллектуальных сетей;
- в схемы функционирования умных городов интегрированы и успешно используются радиочастотные методы сбора/преобразования энергии;
- разрабатываются и применяются системы сбора/преобразования энергии от солнечных, вибрационных и радиочастотных источников энергии для питания источников постоянного напряжения.
- одним из перспективных механизмов динамической оптимизации спроса и предложения энергии является интеллектуальное управление энергопотреблением.

ⁱⁱⁱ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, ИИЭР (США), крупнейшая в мире организация (www.ieee.org/), объединяющая более 300 тыс. технических специалистов из 147 стран, ведущая организация по стандартизации, отвечающая также за сетевые стандарты. Образована в 1963 г. в результате слияния американских обществ IAEE, основанного в 1884 г., и IRE, основанного в 1912 г. ИИЭР проводит и спонсирует технические конференции, симпозиумы и семинары, ведет большую издательскую и образовательную деятельность.

Интеллектуальные отражающие поверхности

Еще одной 6G-технологией, «меняющей правила игры», является интеллектуальная отражающая поверхность (Intelligent Reflecting Surface, IRS). Она создана для повышения производительности, пропускной способности данных и энергоэффективности средств связи за счет фазовой манипуляции передаваемым сигналом с помощью плоской матрицы отражающих компонентов (металлических или диэлектрических накладок) с минимальной мощностью, сложностью и стоимостью. Программируемое пространство IRS обеспечивается с помощью специализированного контроллера, регулирующего условия распространения беспроводной связи. При этом используются особые свойства больших антенных решеток на основе метаматериалов^{iv} (интеллектуальное управление).

Ожидается, что сочетание технологии IRS и ТГц-диапазона позволит расширить возможности 6G-сетей [14]. В этом плане уже разработан ряд подходов:

- предложена архитектура MAC-доступа на основе ИИ для многопользовательских систем связи с поддержкой IRS;
- разработана схема оценки канала на основе глубокой нейронной сети (для повышения производительности и скорости передачи данных терагерцевых 6G-систем);
- созданы алгоритмы распределения ресурсов для повышения производительности восходящей (на спутник) линии связи для IRS-систем.

Похоже, IRS станет одной из существенных технологий 6G ТГц-связи, способной снизить затраты на расширение зоны действия ТГц-диапазона за счет уменьшения числа базовых станций 6G-сетей при сохранении той же производительности [4].

Во 2-й части статьи будут рассмотрены маршрутная карта развития 6G-сетей (ЕС и США), а также примеры различных разработок для этих сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Макушин М.** Связь: динамика и проблемы развертывания 5G-сетей, работы в области 6G. Часть 2 // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Бизнес, технология. 2022. №7. С. 72–82.
2. **S. Dadhanian, Y.-H. Chang and Dr J. Edmondson.** Low-Loss Materials for 5G and 6G 2024–2034: Markets, Trends, Forecasts // IDTechEx. Jan. 2024.
3. **Jiang W., Han B., Habibi M.A., Schotten H.D.** The road towards 6G: A comprehensive survey // IEEE Open J. Commun. Soc., vol. 2, pp. 334–366, 2021. doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
4. **Quy V.K., Chehri A., Quy N.M., Han N.D., Ban N.T.** Innovative Trends in the 6G Era: A Comprehensive Survey of Architecture, Applications, Technologies, and Challenges // IEEE Access. V. 11. 26 April 2023, pp. 39824–39844.
5. **Markovitz O., Segal M.** Advanced routing algorithms for low orbit satellite constellations // Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Jun. 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500740.
6. **Иевлев П.** Что такое Starlink и как работает спутниковый интернет // DigitalOcean. 19.01.2024.
7. OneWeb запускает 15 новых спутников и первый тест для второго поколения // Новая наука. 21.05.2023.
8. Китай намерен создать сеть из 26 тыс. спутников на низкой околоземной орбите // Коммерсант. 10.01.2024.
9. **Xiao Z., Zhu L., Liu Y., Yi P., Zhang R., Xia X.-G., Schober R.** A survey on millimeter-wave beamforming enabled UAV communications and networking // IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 24, no. 1, pp. 557–610, 1st Quart., 2022, doi: 10.1109/COMST.2021.3124512.
10. **He S., Wang N., Ho M., Zhu J., Song G.** Design of a new stress wave communication method for underwater communication // IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 68, No. 8, pp. 7370–7379, Aug. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3003634.
11. **Xu X., Li H., Xu W., Liu Z., L. Yao L., Dai F.** Artificial intelligence for edge service optimization in Internet of Vehicles: A survey // Tsinghua Sci. Technol., vol. 27, No. 2, pp. 270–287, Apr. 2022, doi: 10.26599/TST.2020.9010025.
12. **Hedhly W., Amin O., Shihada B., Alouini M.-S.** A power saving scheme for IEEE 802.15.3d THz wireless communication links // IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 22, no. 4, pp. 1912–1921, Apr. 2023, doi: 10.1109/TMC.2021.3112532.
13. **Liu Y., Xiong Z., Hu O., Niyato D., Zhang J., Miao C., Leung C., Tian Z.** VRepChain: A decentralized and privacy-preserving reputation system for social Internet of Vehicles based on Blockchain // IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 71, No. 12, pp. 13242–13253, Dec. 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3198004.
14. **Peng Z., Chen Z., Pan C., Zhou G., Ren H.** Robust transmission design for RIS-aided communications with both transceiver hardware impairments and imperfect CSI // IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 11, no. 3, pp. 528–532, Mar. 2022, doi: 10.1109/LWC.2021.3135413.

^{iv} **metamaterial** – метаматериал, материал, свойства которого обусловлены периодической микроструктурой, создаваемой человеком. Метаматериалы синтезируются внедрением в исходный природный материал различных периодических структур с самыми различными геометрическими формами, которые модифицируют диэлектрическую и магнитную восприимчивости исходного материала. Условно такие включения можно рассматривать как, чрезвычайно большие искусственные атомы.